



# **Spectroscopie du thulium pompé à 1070 nm dans une fibre alumino-silicate. Fluorescence, photo-noircissement et simulation.**

Jean-François Lupi, Manuel Vermillac, Wilfried Blanc, Bernard Dussardier

## **► To cite this version:**

Jean-François Lupi, Manuel Vermillac, Wilfried Blanc, Bernard Dussardier. Spectroscopie du thulium pompé à 1070 nm dans une fibre alumino-silicate. Fluorescence, photo-noircissement et simulation.. 34e Journées Nationales d'Optique Guidée, Oct 2014, Nice, France. hal-01081784

**HAL Id: hal-01081784**

**<https://hal.science/hal-01081784>**

Submitted on 11 Nov 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# SPECTROSCOPIE DU THULIUM POMPÉ À 1070 NM DANS UNE FIBRE ALUMINO-SILICATE. FLUORESCENCE, PHOTO-NOIRCISSEMENT ET SIMULATION.

Jean-François Lupi<sup>1</sup>, Manuel Vermillac<sup>1</sup>, Wilfried Blanc<sup>1</sup> et Bernard Dussardier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Nice Sophia-Antipolis, Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, CNRS UMR 7336, 06100 Nice

[jean-francois.lupi@unice.fr](mailto:jean-francois.lupi@unice.fr)

## RÉSUMÉ

Les lasers à fibres émettant à de nouvelles longueurs d'ondes sont développés pour différentes applications (médicales, industrielles, capteurs,...). Dans cette communication, nous nous intéressons aux différentes transitions issues du thulium ( $Tm^{3+}$ ) lors d'un pompage à 1,07  $\mu m$  dans une fibre aluminosilicate. Des mesures de spectres de fluorescence et des simulations numériques permettent d'étudier l'évolution, en fonction de la pompe, des populations des niveaux  $^3H_4$  et  $^1G_4$  et de déterminer les longueurs d'onde d'intérêt pour l'amplification. Un phénomène de photo-noircissement est aussi discuté dans cette présentation.

**MOTS-CLEFS :** *spectroscopie ; fibre ; photo-noircissement ; thulium.*

## 1. INTRODUCTION

À l'heure actuelle, les lasers et les amplificateurs à fibre à base de silice fonctionnent principalement dans le proche infra-rouge à 1, 1,5 et 1,9  $\mu m$ , respectivement grâce à des dopages ytterbium, erbium et thulium. Les composants à base de verre fluoré, du fait de leur basse énergie de phonon, sont opérationnels sur un nombre bien plus grand de longueur d'onde. Toutefois, dans ce type de verre, la puissance de sortie est limitée par le faible seuil au dommage optique [1].

La couverture spectrale des fibres à base de silice est en particulier limitée par l'énergie de phonon élevée de ce verre entraînant des désexcitations non-radiatives. Par exemple, huit transitions de l'ion thulium ( $Tm^{3+}$ ) sont exploitées dans le ZBLAN contre une seule dans la silice. Cependant, nous avons montré qu'en ajoutant de l'aluminium, la durée de vie du niveau  $^3H_4$  du thulium peut être multipliée par un facteur 5 [2] ce qui permet d'envisager de nouvelles longueurs d'onde dans la silice.

Dans cette communication, nous nous intéressons à un pompage à 1,07  $\mu m$  qui permet d'exploiter les lasers à fibres dopés  $Yb^{3+}$  comme source de pompage. Dans une précédente analyse numérique nous nous étions intéressés uniquement à l'émission à 0,81  $\mu m$  [3]. Dans cette communication, nous étudions l'ensemble des émissions issues des niveaux  $^3H_4$  et  $^1G_4$  de  $Tm^{3+}$ . Nous présentons une première mesure de la fluorescence d'une fibre en silice co-dopée thulium et aluminium pompée à 1,07  $\mu m$ . Les transitions les plus favorables pour l'amplification seront discutées sur la base d'une analyse numérique. L'effet du photo-noircissement sera discuté dans le dernier paragraphe.

## 2. DIAGRAMME D'ÉNERGIE DU THULIUM ET SCHÉMA DE POMPAGE

Le système de pompage utilisé repose sur un mécanisme d'up-conversion en trois étapes représenté sur la Fig. 1. La première transition  $^3H_6 \rightarrow ^3H_5$  est très peu résonnante alors que la deuxième transition  $^3F_4 \rightarrow ^3H_4$  est très résonnante. Il en résulte que la population du niveau  $^3F_4$  est faible et que ce schéma de pompage est défavorable à la réalisation d'un laser à 1,9  $\mu m$ . Le pompage à cette longueur d'onde conduit à une troisième absorption du niveau  $^3H_4$  vers le niveau  $^1G_4$ , en défaveur d'un laser à 0,81  $\mu m$ . La pompe est aussi résonnante sur la transition  $^1G_4 \rightarrow ^3H_4$ .

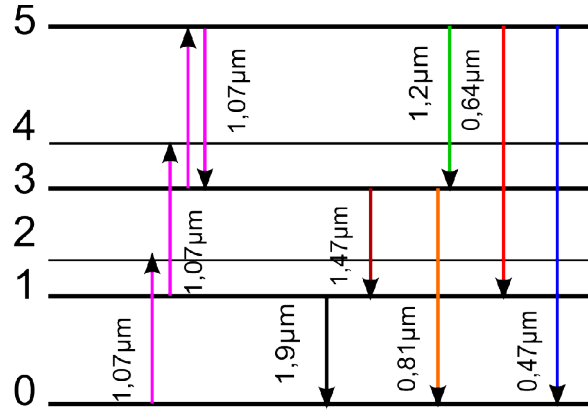


Fig. 1 : Diagramme d'énergie (simplifié) de  $Tm^{3+}$ , avec schéma de pompage à  $1,07 \mu m$  et émissions spontanées.

### 3. MODÈLE NUMÉRIQUE

On modélise le système en utilisant les équations de taux. On numérote les niveaux comme suit :  $^3H_6 \rightarrow 0$ ,  $^3F_4 \rightarrow 1$ ,  $^3H_5 \rightarrow 2$ ,  $^3H_4 \rightarrow 3$ ,  $^3F_{2,3} \rightarrow 4$ ,  $^1G_4 \rightarrow 5$  voir figure 1. On appelle  $N_i$  la population associée au  $i^{\text{ème}}$  niveau. Les transferts d'énergie, du fait de la faible concentration en thulium, sont négligés dans ce modèle. Les équations ci-dessous donnent une écriture synthétique de l'ensemble des processus considérés.

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j \neq i}^N N_j W_{ji} + N_{i+1} A_{i+1}^{nr} + \sum_{j > i}^N N_j A_{ji}^r - N_i \left( \sum_{k \neq i}^N W_{ik} + A_i^{nr} + \sum_{k < i}^N A_{ik}^r \right)$$

$$W_{ij} = \sigma_{ij} \frac{P}{\frac{hc}{\lambda} \pi a^2}$$

Les taux de désexcitations non-radiatives sont décrits par les termes  $A_i^{nr}$ , les désexcitations radiatives par les termes  $A_{ij}^r$  et leurs valeurs sont soit tirées de la littérature [4], soit mesurées. Le couplage avec le champ (absorption et émission stimulée) est décrit par les termes  $W_{ij}$ , où  $\sigma_{ij}$  est la section efficace (à la longueur d'onde de pompe) associée à la transition du niveau  $i$  vers le niveau  $j$ ,  $h$  est la constante de Planck,  $c$  la vitesse de la lumière,  $P$  la puissance guidée dans la fibre,  $a$  est le rayon du cœur et  $\Gamma$  le facteur de recouvrement entre le mode transverse du champ et la distribution spatiale des ions  $Tm^{3+}$ . Les termes  $\sigma_{02}$  et  $A^{nr}_3$  sont mesurés. Seules les sections efficaces  $\sigma_{02}$ ,  $\sigma_{14}$ ,  $\sigma_{33}$  et  $\sigma_{35}$  sont considérées. La section efficace  $\sigma_{35}$  est le seul paramètre libre du système. En faisant évoluer jusqu'à l'état stationnaire les équations de taux, l'évolution des populations est obtenue. On ajuste  $\sigma_{35}$  pour accorder mesures et simulations.

### 4. RÉSULTATS

Les intensités des différentes bandes d'émission de  $Tm^{3+}$  sont intégrées dans les intervalles  $0,44-0,5 \mu m$ ,  $0,6-0,7 \mu m$ ,  $0,7-1 \mu m$ ,  $1,1 \mu m-1,3 \mu m$ , et  $1,4-1,5 \mu m$  (Fig. 1). Les intensités de chaque bande sont normalisées à 1 pour une puissance de 4 W. Les variations d'intensité en fonction de la puissance de pompe sont reportées, en échelle log-log, sur la figure 2a. Les intensités des transitions issues des niveaux  $^3H_4$  ( $0,8$  et  $1,45 \mu m$ ) et  $^1G_4$  ( $1,2 \mu m$ ,  $0,64 \mu m$  et  $0,45 \mu m$ ) évoluent différemment.

Les résultats de simulations (Fig 2b), montrent l'évolution des populations. A basse puissance le niveau 1 croît de manière linéaire, le niveau 3 de manière quadratique et le niveau 5 de manière cubique; ce qui correspond bien à des absorptions respectives à 1, 2 et 3 photons. À moyenne puissance de pompe le niveau 1 sature, puis décroît, car il alimente les niveaux suivants. À haute puissance les niveaux 3 et 5 saturent conjointement, ce qui est dû à une transparence photo induite par la pompe.

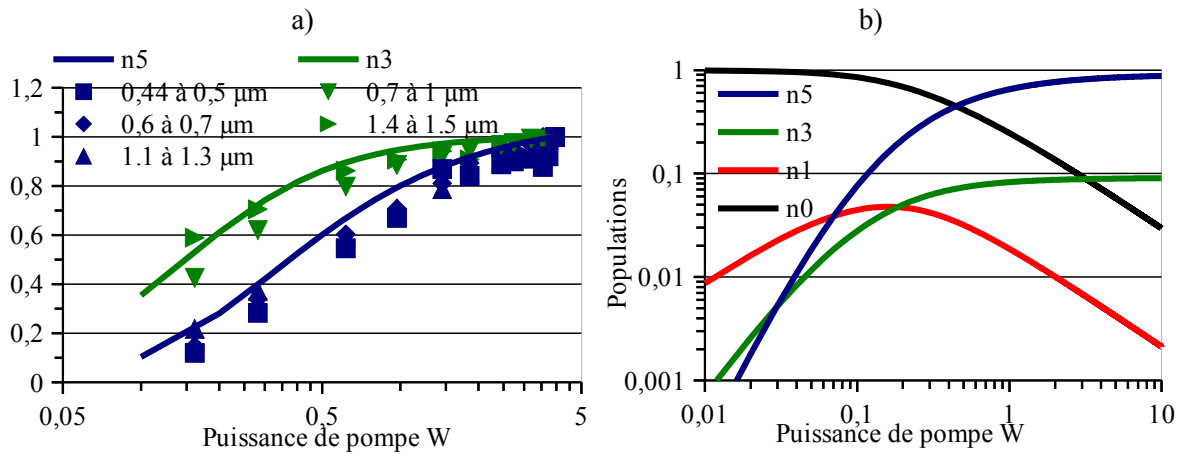


Fig. 2 (a) : Puissance intégrée obtenue expérimentalement (points) et courbe issue de la simulation numérique (trait plein). (b) : Évolution des populations obtenue par étude numérique (en absolu).

## 5. PHOTO-NOIRCISSEMENT

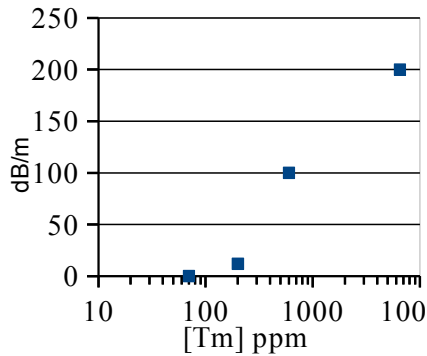


Fig. 3 Noircissement photo-induit à 0,550 μm en dB/m après 1W de pompe pendant 30 min.

Lors des mesures de fluorescence, du photo-noircissement a été observé. Cela se traduit par une décroissance de la puissance de fluorescence, sur des temps longs (~10 minutes), à pompe fixe. L'augmentation de l'atténuation avec la concentration en Tm<sup>3+</sup> est reportée sur la figure 4. Il est probable qu'un échange d'énergie Tm<sup>3+</sup>-Tm<sup>3+</sup> soit à la base du mécanisme de dégradation de la fluorescence. Nous émettons l'hypothèse suivante : la pompe permet d'atteindre le niveau <sup>1</sup>G<sub>4</sub>, puis un échange d'énergie Tm<sup>3+</sup>-Tm<sup>3+</sup> fait passer un ion Tm<sup>3+</sup> de <sup>1</sup>G<sub>4</sub> vers <sup>1</sup>D<sub>2</sub> enfin la pompe amène vers les états <sup>3</sup>P<sub>0,1,2</sub>. Un transfert d'énergie avec un défaut de la silice peut avoir lieu et causerait le photo-noircissement.

## CONCLUSION

Après avoir mesuré la fluorescence du thulium pompé à 1,07μm et après avoir ajusté un modèle d'équations de taux à un seul paramètre, nous pouvons conclure que les fibres aluminosilicate dopées au thulium et pompées à 1,07 μm sont une piste intéressante pour l'amplification sur les bandes : 1,2μm, 0,64μm et 0,45μm. Toutefois, l'optimisation de telles fibres nécessite de s'affranchir des mécanismes de photo-noircissement. Ceci sera développé lors de la présentation de ces travaux au cour conférence.

## RÉFÉRENCES

- [1] Zhu, X., & Peyghambarian, N. (2010). High-power ZBLAN glass fiber lasers: review and prospect. *Advances in Optoelectronics*, 2010.
- [2] B. Faure, W. Blanc, B. Dussardier, and G. Monnom, "Improvement of the Tm<sup>3+</sup> : <sup>3</sup>H<sub>4</sub> level lifetime in silica optical fibers by lowering the local phonon energy," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 353, no. 29, pp. 2767–2773, Sep. 2007.
- [3] P. Peterka, I. Kasik, A. Dhar, B. Dussardier, and W. Blanc, "Theoretical modeling of fiber laser at 810 nm based on thulium-doped silica fibers with enhanced <sup>3</sup>H<sub>4</sub> level lifetime," *Optics Express*, vol. 19, no. 3, pp. 2773–2781, Jan. 2011.
- [4] Tsang, Y. H., Coleman, D. J., & King, T. A. (2004). High power 1.9 μm Tm<sup>3+</sup>-silica fibre laser pumped at 1.09 μm by a Yb<sup>3+</sup>-silica fibre laser. *Optics communications*, 231(1), 357-364.